

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Vinko Baršun

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Vladimir Soldo, izv. prof.

Student:

Vinko Baršun

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem Dr. sc. Vladimiru Soldi, izv. prof. koji je prihvatio mentorstvo te mi ustupio potrebnu dokumentaciju i stručno me vodio kroz moj diplomski rad.

Vinko Baršun



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne
simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

Referada za diplomske i završne ispite

Obrazac DS - 3A/PDS - 3A

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	XII
1. UVOD.....	1
1.1. Rashladne komore.....	1
2. OPIS SUSTAVA	2
2.1. Projektni zadatak.....	2
2.2. Projektni uvjeti.....	3
2.3. Sustav hlađenja	3
3. TERMODINAMIČKI PRORAČUN.....	4
3.1. Transmisijski teret.....	4
3.2. Toplinsko opterećenje hladionice od hlađenih proizvoda.....	7
3.3. Odabrani tipovi proizvoda	8
3.4. Toplinsko opterećenje od hlađenja proizvoda	10
3.5. Toplinsko opterećenje od pakiranja proizvoda	13
3.6. Rashladno opterećenje zbog infiltracije zraka	14
3.7. Toplinsko opterećenje od rasvjete.....	17
3.8. Toplinsko opterećenje od ljudi.....	18
3.9. Toplina disanja proizvoda.....	19
3.10. Toplinsko opterećenje uslijed stvaranja inja na isparivaču.....	20
3.11. Toplinsko opterećenje od elektromotora isparivača	22
3.12. Vršno toplinsko opterećenje.....	25
4. PRORAČUN KOMPONENTI RASHLADNOG UREĐAJA	26
4.1. Minus režim	27
4.2. Plus režim.....	29
4.3. Dimenzioniranje isparivača komore za skladištenje smrznutih proizvoda.....	32
4.4. Dimenzioniranje kondenzatora komore za skladištenje smrznutih proizvoda.....	40
4.5. Proračun cjevovoda.....	49
5. ODABIR KOMPONENTI RASHLADNOG SUSTAVA ZA UGRADNJU.....	52

5.1. Odabir kompresora.....	52
5.2. Odabir isparivača i kondenzatora za ugradnju	53
6. Specifikacija materijala	54
7. TEHNIČKI OPIS.....	56
8. ZAKLJUČAK.....	57
PRILOZI.....	58
LITERATURA.....	59

POPIS SLIKA

Slika 1 Rashladna komora.....	1
Slika 2 Razmještaj rashladnih komora sa temperaturnim režimima rada	3
Slika 3 Shematski prikaz rashladnog procesa	26
Slika 4 Karakteristične točke minus režima	27
Slika 5 Karakteristične točke plus režima	29
Slika 7 Dimenzije isparivača.....	39
Slika 8 Dimenzije kondenzatora	48

POPIS TABLICA

Tabela 1 Podaci o komori za hlađenje mlijeka	6
Tabela 2 Podaci o komori za hlađenje svježeg povrća.....	6
Tabela 3 Podaci o komori za hlađenje suhomesnatih proizvoda	6
Tabela 4 Podaci o komori za hlađenje smrznutih proizvoda	7
Tabela 5 Prikaz ukupnih transmisivskih troškova	7
Tabela 6 Dimenzijski podaci prostorijsa	7
Tabela 7 Tipovi odabranih proizvoda sa udjelima	8
Tabela 8 Podaci o proizvodima preuzeti iz Lth priručnika	9
Tabela 9 Toplinska opterećenja pojedinih proizvoda nastala prilikom hlađenja	11
Tabela 10 Ukupna toplinska opterećenja nastala uslijed hlađenja proizvoda	12
Tabela 11 Ukupna toplinska opterećenja zbog pakiranja.....	13
Tabela 12 Rashladno opterećenje zbog infiltracije	16
Tabela 13 Toplinsko opterećenje od rasvjete	17
Tabela 14 Toplinsko opterećenje od ljudi	18
Tabela 15 Toplinsko opterećenje zbog disanja proizvoda	19
Tabela 16 Masa vlage nastala kaliranjem	20
Tabela 17 Toplinsko opterećenje zbog kaliranja.....	21
Tabela 18 Toplinska opterećenja prostorijsa	23
Tabela 19 Ukupna toplinska opterećenja	24
Tabela 20 Opterećenja pomoću kojih ulazim u proračun	25
Tabela 21 Karakteristične točke minus režima	27
Tabela 22 Karakteristične točke plus režima	29
Tabela 23 Karakteristične brzine strujanja radne tvari u cijevima.....	49
Tabela 24 Odabir dimenzija cjevovoda minus režim.....	50
Tabela 25 Odabir dimenzija cjevovoda plus režim	51
Tabela 26 Odabir kompresora za radnu tvar R404A.....	52
Tabela 27 Odabir isparivača.....	53
Tabela 28 Odabir kondenzatora	53
Tabela 29 Specifikacija materijala	54

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

Broj crteža	Naziv crteža
1	Hladnjak zraka
1/1	Cijevna stijena
1/2	Al-lamela
1/6	MS-razdjelnik
1/8	Cijevni kolektor
2	Dispozicija rashladne opreme
3	Shema spajanja opreme za plus režim rada
4	Shema spajanja opreme za minus režim rada
5	Shema spajanja regulacije rashladnih komora

POPIS OZNAKA

Oznaka	Dimenzija	Naziv
A	$[m^2]$	vanjska površina izolacijskih panela
A	$[m^2]$	površina poda izoliranog skladišta
A_{el}	$\left[\frac{m^2}{m}\right]$	površina za izmjenu topline na vanjskoj strani
A_f	$\left[\frac{m^2}{m}\right]$	površina rebara
A_{il}	$\left[\frac{m^2}{m}\right]$	površina za izmjenu topline na unutarnjoj strani
A_i	$[m^2]$	površina izmjene topline
A_{mt}	$\left[\frac{m^2}{m}\right]$	vanjska površina cijevi između rebara
A_z	$[m^2]$	najmanja površina između cijevi i lamela za strujanje zraka
B	$[m]$	širina izmjenjivača topline
C	$[-]$	koeficijent
C_k	$[-]$	koeficijent otpornosti kontakta između cijevi i lamela
C_r	$[-]$	koeficijent
C_s	$[-]$	koeficijent
c_a	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	specifični toplinski kapacitet zraka
c_{p1}	$[kJ/kgK]$	specifični toplinski kapacitet proizvoda iznad zamrzavanja
c_{p2}	$[kJ/kgK]$	specifični toplinski kapacitet ispod zamrzavanja
c_{pp}	$[kJ/kgK]$	specifični toplinski kapacitet pakiranja
c_s	$[kJ/kgK]$	specifični toplinski kapacitet leda
c_p	$[kJ/kgK]$	specifični toplinski kapacitet R404A
d	$[mm]$	promjer cjevovoda
d_{eqv}	$[m]$	ekvivalentan promjer
d_e	$[mm]$	vanjski promjer cijevi
d_i	$[mm]$	unutarnji promjer cijevi
d_m	$[mm]$	srednji promjer cijevi
E	$[-]$	efikasnost lamela

f	$[-]$	faktor za procjenu rada ventilator
f_t	$[mm]$	debljina lamela
G	$\left[\frac{kg}{m^2 s}\right]$	brzina protoka zraka u cijevima
$g_{mR404A-}$	$\left[\frac{kg}{s}\right]$	protok radne tvari minus režima
h_j	$[kJ]$	entalpija vlage u obliku leda
h	$[mm]$	visina lamela
H	$[m]$	visina izmjenjivača topline
h_{a1}	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	entalpija zraka prije usisa isparivača
h_{a2}	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	entalpija zraka poslije usisa isparivača
h_z	$[kJ]$	latentna toplota zamrzavanja proizvoda
i_{in}	$[-]$	broj ulaznih cijevi (krugova)
i_r	$[-]$	broj redova cijevi
i_t	$[-]$	broj cijevi u jednom redu
k	$[W/(m^2 * K)]$	ukupni koeficijent prolaza topline
k_i	$\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$	ukupni koeficijent prijelaza topline isparivača
L	$[m]$	dubina izmjenjivača topline
L_{ov}	$[m]$	ukupna duljina cijevi
L_1	$[m]$	duljina cijevi u jednom redu
m	$[kg]$	masa proizvoda
\dot{m}_a	$\left[\frac{kg}{s}\right]$	protok suhog zraka kroz isparivač
m_f	$[-]$	koeficijent
m_k	$[kg]$	masa vlage otpuštena prilikom kaliranja
m_p	$[kg]$	masa pakiranja
n_{ras}	$[kW/m^2]$	instalirana snaga rasvjete
n	$[-]$	koeficijent
n_i	$\left[\frac{1}{dan}\right]$	broj izmjena zraka po danu
n_r	$[-]$	broj ljudi
Nu	$[-]$	Nusselt-ov broj
P	$[W]$	snaga kompresora uvećana za faktor 1,4

P_{EM}	[W]	električna snaga ventilatora
P_k	[W]	snaga kompresora
Δp	[Pa]	pad tlaka zraka
Q_{hl}	[J]	odvedena toplina od proizvoda
Q_{inja}	[J]	toplinsko opterećenje kaliranja
Q_{po}	[J]	toplinsko opterećenje pothlađivanja proizvoda
Q_{pp}	[J]	toplinsko opterećenje od pakiranja
Q_r	[J]	ukupna toplinsko opterećenje od proizvoda
Q_z	[J]	toplinsko opterećenje zamrzavanja proizvoda
q_{ip}	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	pretpostavljeni toplinski tok
q_i	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	stvarni toplinski tok
q_k	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	specifični učinak kondenzacije
q_o	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	specifični rashladni učinak
q_p	$\left[\frac{W}{osoba}\right]$	toplinsko opterećenje osobe
Re	[—]	Reynolds-ov broj
R_i	$\left[\frac{m^2K}{W}\right]$	toplinska otpornost zbog naslaga na strani rashladnog sredstva
R_o	$\left[\frac{m^2K}{W}\right]$	toplinska otpornost zbog naslaga na strani zraka
r_{sw}	[kJ/kg]	toplina smrzavanja leda
R_t	$\left[\frac{m^2K}{W}\right]$	toplinska otpornost materijala cijev
s_1	[mm]	razmak između cijevi u vertikalnom smjeru
s_2	[mm]	razmak između cijevi u horizontalnom smjeru
s_f	[mm]	razmak između lamela
t_{a1}	[°C]	ulazna temperatura zraka isparivača
t_{a1}	[°C]	ulazna temperatura zraka isparivača
t_{a2}	[°C]	izlazna temperatura zraka isparivača
t_{am}	[°C]	srednja vrijednost temperature zraka
t_c	[°C]	temperatura kondenzacije
t_e	[°C]	temperatura isparivanja

t_s	[°C]	temperatura na vanjskoj strani isparivača
Δt_m	[°C]	logaritamska razlika temperature
v_1	[°C]	ulazna temperatura proizvoda u hladionicu
v_2	[°C]	krajnja temperatura proizvoda
v_3	[°C]	temperatura pothlađene kapljevine
V_h	[m ³]	volumen hladnjače
v_i	[°C]	unutarnja temperatura
v_{isp}	[°C]	temperatura na izlazu iz isparivača
\dot{V}_i	[m ³ /s]	volumni protok zraka po danu
v_k	[°C]	temperatura kondenzacije
v_o	[°C]	vanjska temperatura
$v_{rošenja}$	[°C]	temperature rošenja
$v_{stijenke}$	[°C]	temperatura vanjske stijenke komore za smrznute proizvode
v_z	[°C]	temperatura zamrzavanja proizvoda
Δv	[°C]	razlika između vanjske temperature zraka i temperature hlađenog prostora
w	[$\frac{m}{s}$]	brzina protoka zraka u najmanjem presjeku
w_f	[$\frac{m}{s}$]	brzina struje zraka na ulasku u isparivač
x_1	[m]	debljina izolacije
x_2	[m]	debljina zida

Simbol	Dimenzija	Naziv
α_i	$[W/(m^2 * K)]$	unutarnji koeficijent prijelaza topline
α_o	$[W/(m^2 K)]$	vanjski koeficijent prijelaza topline
α_R	$[W/(m^2 K)]$	koeficijent prijelaza topline
α_{ai}	$[W/(m^2 K)]$	koeficijent prijelaza topline vezan na unutrašnji promjer cijevi
α_{aw}	$[W/(m^2 K)]$	koeficijent prijelaza topline šahovski raspored cijevi
β	$[-]$	odnos između vanjske i unutarnje površine za izmjenu topline
δ_t	$[m]$	debljina cijevi
η_{ras}	$[-]$	stupanj uključenosti rasvjete
λ_1	$[W/mK]$	koeficijent toplinske vodljivosti izolacijskog panela
λ_2	$[W/mK]$	koeficijent toplinske vodljivosti zida
λ_a	$[W/mK]$	toplinska vodljivost zraka
λ_f	$[W/mK]$	toplinska vodljivost aluminijske
λ_t	$[W/mK]$	toplinska vodljivost bakra
ρ_a	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	gustoća zraka
τ	$[s]$	vrijeme boravka robe u hladnjači
τ_e	$[h]$	režim rada komercijalnih rashladnih uređaja
τ_r	$[h]$	vrijeme provedeno u hladenom prostoru
ν_a	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	kinematička viskoznost zraka
Φ_d	$[W]$	rashladno opterećenje disanja proizvoda
Φ_e	$[W]$	vršno rashladno opterećenje
Φ_{EM}	$[W]$	rashladno opterećenje elektromotora
Φ_i	$[W]$	rashladno opterećenje infiltracije
Φ_{i-}	$[W]$	učinak isparivača komore minus režima
Φ_{inje}	$[W]$	rashladno opterećenje kaliranja
Φ_{k-}	$[W]$	potreban učinak kondenzatora minus režim
Φ_{kon-}	$[W]$	učinak kondenzatora minus režim
Φ_{ljudi}	$[W]$	rashladno opterećenje ljudi
Φ_p	$[W]$	procijenjeno toplinsko opterećenje

Φ_r	[W]	rashladno opterećenje hlađenja proizvoda
Φ_{ras}	[W]	rashladno opterećenje rasvjete
Φ_{tr}	[W]	rashladno opterećenje transmisije
Φ_u	[W]	ukupno rashladno opterećenje
ψ	[W/kg]	toplina disanja robe

SAŽETAK

U diplomskom radu izveden je termodinamički proračun rashladnih komora za skladištenje prehrambenih namirnica. Detaljno je prikazan proračun rashladnih kapaciteta prostorija te svih njegovih opterećenja. U radu je projektiran isparivač komore za hlađenje smrznutih proizvoda. Prezentiran je opis rada rashladnog sustava te način njegovog funkcioniranja. Proveden je odabir komponenti dijelova sustava prema izvedenom proračunu. Podaci su preuzeti iz kataloga proizvođača rashladne opreme. Prikazane su sheme spajanja rashladne opreme i automatske regulacije, te dispozicijski crtež plana postavljanja rashladne opreme unutar i izvan prostora komora.

Za projektirani isparivač u komori za duboko smrznutu robu izrađen je detaljan radionički crtež.

1. UVOD

Namirnice koje kupujemo u trgovinama ili na tržnici najčešće su se u distributivnom lancu više puta nalazile u rashladnim komorama, bilo da se radilo o zamrzavanju, čuvanju, transportu ili izlaganju u hlađenom izlogu trgovine. Čuvanje hrane na niskim temperaturama je ljudima poznato od davnina, ali je tek sredinom 18. stoljeća objašnjeno usporavanje kemijskih procesa i utjecaj bakterija na kvarenje hrane. Danas je prehrambena industrija nezamisliva bez tehnologije hlađenja: od proizvodnje, čuvanja, prerade i na kraju izlaganja u hlađenim vitrinama trgovina. Različite vrste hrane (meso, povrće) zahtijevaju i različite načine čuvanja; tako će se npr. voće čuvati na temperaturama malo iznad temperature ledišta, dok će se meso u relativno kratkom vremenu duboko smrjavati i time omogućiti čuvanje hrane na duže vremenske periode.

1.1. Rashladne komore

Uloga rashladne komore je da na najbolji način izolira robu koju zamrzavamo ili čuvamo od utjecaja okoline. Stoga, komore primarno moraju biti dobro toplinski izolirane. Kao izolacija zidova i stropa (krova) često se koriste paneli izvana obloženi limom, a ispunjeni poliuretanskom pjenom.



Slika 1 Rashladna komora

Rashladni sustav mora svojim rashladnim učinkom savladati hlađenje robe ali i ostale toplinske dobitke: toplinu dobivenu rasvjetom; toplinu od ljudi; transmisivske gubitke kroz strop, pod i zidove komore na koje otpada i do 50% rashladnog kapaciteta.

2. OPIS SUSTAVA

2.1. Projektni zadatak

Rashladni sustav na području grada Zagreba se sastoji od četiri rashladne komore za prihvrat prehrambenih proizvoda. Potrebno je dimenzionirati i ugraditi rashladno postrojenje u projektirani objekt. Smještaj zrakom hlađenih kondenzatora je na krovu objekta, pod uvjetom da su smješteni tako da ne smetaju jedan drugome. Presjek slobodnog strujanja zraka je dovoljno velik da ne dolazi do otežanog rada zrakom hlađenog kondenzatora. Rashladnu instalaciju je potrebno izvesti tako da bude što jednostavnija za rukovanje, uz upotrebu jednog rashladnog medija R404A za komore sa pozitivnim temperaturama, odnosno komoru za smrznute proizvode. Izolaciju cjevovoda potrebno je izvesti u debljini koju propisuje proizvođač svojim dijagramima (temperatura medija u cijevima – temperatura i vlažnost okolnog zraka). U komorama za skladištenje smrznutih proizvoda potrebno je izolirati cijevi za odvod kondenzata. Kod konstrukcije rashladne komore mora se uzeti u obzir i difuzija vodene pare prema hlađenom prostoru komore te se zbog toga u izolaciju postavlja i parna brana. U komore se ugrađuju brzo zatvarajuća vrata kako bi se smanjili toplinski gubici. Potrebno je izvesti zajednički sustav regulacije i praćenja temperature komora.

2.2. Projektni uvjeti

Projektni uvjeti za područje Grada Zagreba korišteni u proračunu

$$v_{ok} = 35^{\circ}$$

$$\varphi = 40\%$$

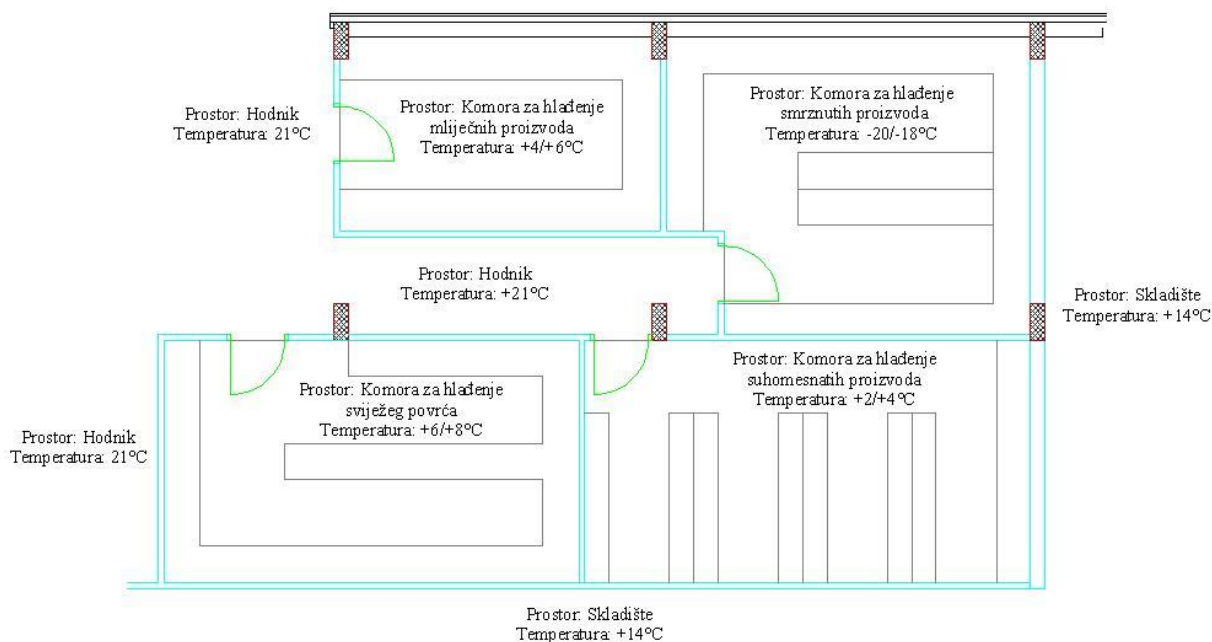
$$p_{ok} = 1013,25 \text{ Pa}$$

2.3. Sustav hlađenja

Zbog postojanja velikih razlika u temperaturama isparivanja za različite rashladne uređaje, odabrana je podjela sustava na dva dijela, na komore za plus i komore za minus režim dubokosmrznute proizvode. Ukupan potrebnii učinak plus sustav je $\Phi_{i+} = 8,31 \text{ kW}$, a minus $\Phi_{i-} = 5,39 \text{ kW}$.

Plus režim radi na temperaturi isparivanja od -6°C , pri čemu hladi sve prostorije koje zahtijevaju više temperature isparavanja (mlijeko, svježe povrće, suhomesnati proizvodi).

Minus režim radi na temperaturi isparavanja od -30°C , a koristi se za skladištenje smrznutih proizvoda.



Slika 2 Razmještaj rashladnih komora sa temperaturnim režimima rada

3. TERMODINAMIČKI PRORAČUN

Termodinamički proračun je izveden na osnovu podataka dobivenih iz diplomskog zadatka za građevinski dio (veličine prostora, vrste i debljine građevinskih materijala, te vrste i debljine termodinamičke izolacije) i tehnološki dio (uvjeti u prostorijama količina i vrsta robe, broj zaposlenih i drugo).

3.1. Transmisijski teret

Transmisijski dio tereta izračunat za svaku prostoriju posebno

$$\Phi_{tr} = k * A * \Delta v \text{ [W]} \quad (1)$$

Φ_{tr} [W] - toplinski tok

k [W/(m² * K)] - ukupni koeficijent prolaza topline

A [m²] - vanjska površina izolacijskih panela

Δv [°C] - razlika između vanjske temperature zraka i temperature
hlađenog prostora

Prilikom izračuna transmisijskog tereta potrebno je izračunati površine zidova te odrediti temperaturne razlike susjednih prostorija. Proračun ukupnog koeficijenta prolaza topline kroz zidove računa se:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{x_1}{\lambda_1} + \frac{x_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (2)$$

x_1 [m] - debljina izolacije

x_2 [m] - debljina zida

λ_1 [W/m * K] - koeficijent toplinske vodljivosti izolacijskog panela

λ_2 [W/m * K] - koeficijent toplinske vodljivosti zida

α_i [W/(m² * K)] - unutarnji koeficijent prijelaza topline

α_o [W/(m² * K)] - vanjski koeficijent prijelaza topline

Prilikom određivanja debljine izolacionog panela potrebno je zadovoljiti uvjet da temperatura vanjske stjenke najviše toplinski opterećenog zida nije niža od temperature rošenja :

$$v_{stijenke} = v_o - \frac{k}{\alpha_o} (v_o - v_i) \quad (3)$$

v_i [°C] - unutarnja temperatura

v_o [°C] - vanjska temperatura

Temperatura rošenja za projektne uvjete iznosi:

$$v_{rošenja} = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vrijednost temperature vanjske stjenke komore za smrzavanje:

$$v_{stijenke} = 34,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

što zadovoljava kriterij:

$$v_{stijenke} > v_{rošenja}$$

Debljine zidova su preuzete iz nacrtu zgrade te iznose 300 mm. Podatke o vrijednostima unutarnjih i vanjskih koeficijenata prijelaza topline preuzeti su iz Skripte „Projektiranje rashladnih sustava“. Prilikom proračuna pojedinih ploha prostorija uzete su u obzir debljine, panela te postojanje zida uz panel koji pruža dodatnu izolaciju.

Tabela 1 Podaci o komori za hlađenje mlijeka

Komora za hlađenje mlijeka	A[m ²]	Temperatura susjedne prostorije[°C]	k[W/m ² K]	Φ _{tr} [W]
Pod	16,8	21	0,217	54,72
Strop	16,8	35	0,220	106,95
Sjeverni zid	15,75	35	0,220	100,26
Zapadni zid	9,6	21	0,238	34,20
Južni zid	15,75	21	0,238	56,11
Istočni zid	9,6	-20	0,161	-40,19
			Ukupno:	312,05

Tabela 2 Podaci o komori za hlađenje svježeg povrća

Komora za hlađenje svježeg povrća	A[m ²]	Temperatura susjedne prostorije[°C]	k[W/m ² K]	Φ _{tr} [W]
Pod	29,61	21	0,217	83,58
Strop	29,61	21	0,217	83,58
Sjeverni zid	21,15	21	0,238	65,30
Zapadni zid	12,6	21	0,238	38,90
Južni zid	21,15	14	0,238	30,14
Istočni zid	12,6	2	0,238	-17,96
			Ukupno:	283,56

Tabela 3 Podaci o komori za hlađenje suhomesnatih proizvoda

Komora za hlađenje suhomesnatih proizvoda	A[m ²]	Temperatura susjedne prostorije[°C]	k[W/m ² K]	Φ _{tr} [W]
Pod	32,34	21,00	0,22	133,43
Strop	32,34	21,00	0,22	133,43
Sjeverni zid lijevo	6,90	21,00	0,24	31,14
Sjeverni zid desno	16,20	-20,00	0,16	-57,39
Zapadni zid	12,60	8,00	0,24	17,96
Južni zid	23,10	14,00	0,24	65,84
Istočni zid	12,60	14,00	0,24	35,91
			ukupno:	360,30

Tabela 4 Podaci o komori za hlađenje smrznutih proizvoda

Komora za hlađenje smrznutih proizvoda	A[m ²]	Temperatura susjedne prostorije[°C]	k[W/m ² K]	Φ _{tr} [W]
Pod	33,04	21	0,15	205,07
Strop	33,04	35	0,15	277,18
Sjeverni zid	19,11	35	0,16	170,60
Zapadni zid gore	10,95	6	0,16	45,84
Zapadni zid dole	4,8	21	0,16	31,69
Južni zid gore	2,55	21	0,16	16,83
Južni zid dole	16,2	2	0,16	57,39
Istočni zid	16,2	14	0,16	88,69
ukupno:				893,30

Tabela 5 Prikaz ukupnih transmisijskih troškova

Prostorija	Φ _{tr} [W]
Mlijeko	312,05
Svježe povrće	283,56
Suhomesnati proizvodi	360,30
Smrznuti proizvodi	893,30

3.2. Toplinsko opterećenje hladionice od hlađenih proizvoda

Tabela 6 Dimenzijski podaci prostorija

Rashladne komore za hlađenje	Površine poda prostorija hladnjače[m ²]		Volumen prostorija hladnjače[m ³]	
	ukupne	korištene	ukupne	korištene
mlijeka	17,33	8,54	51,98	25,61
svježeg povrća	27,40	12,66	82,20	37,98
suhomesnatih proizvoda	29,40	10,04	88,20	30,12
smrznutih proizvoda	29,01	14,13	87,03	42,39

Za određivanje toplinskog opterećenja od hladjenih proizvoda izrađen je proračun prema dobivenim podacima iz Auto cad crteža, na kojem su definirane površine koje se koriste za skladištenje robe te njihov razmještaj unutar prostora.

3.3. Odabrani tipovi proizvoda

Nakon određivanja veličina skladišnog prostora potrebno je odabrati tip proizvoda i njihove količine. Pošto su dane generalne informacije o namjeni rashladnih komora odabrani su neki od najčešćih predstavnika.

Tabela 7 Tipovi odabranih proizvoda sa udjelima

Tipovi proizvoda i udjeli	kg/m ²	Masa robe [kg]
Mlijeko	810,00	6914,16
	kg/m ³	Masa robe [kg]
Luk 20%	106,38	808,09
krastavci 20%	133,33	1012,80
repa 20%	123,46	937,78
krumpir 20%	80,00	607,68
rajčica 20%	300,00	2278,80
Svježe povrće	ukupno:	5645,14
perad 25%	350,00	2635,50
riba 25%	350,00	2635,50
govedina 25%	300,00	2259,00
svinjetina 25%	450,00	3388,50
suhomesnati proizvodi	ukupno:	10918,50
perad 25%	350,00	1483,55
riba 25%	350,00	1483,55
govedina 25%	300,00	1271,61
svinjetina 25%	450,00	1907,42
smrznuti proizvodi	ukupno:	6146,12

Na idućoj tablici su prikazani podaci o toplinskim osobinama proizvoda sa temperaturama prijevoza robe preuzeti iz Lth priručnika i temperaturama na kojima se skladište.

Tabela 8 Podaci o proizvodima preuzeti iz Lth priručnika

	Specifični toplinski kapacitet		Latentna toplina	Temperatura pri istovaru	Temperatura skladištenja
	prije kJ/kgK	poslije kJ/kgK	kJ/Kg		
Proizvod	smrzavanja			°C	°C
Mlijeko	3,9	-	-	6	4
Luk	3,85	1,97	297	10	6
krastavci	4,06	2,05	318	10	6
repa	4,06	2,05	318	10	6
krumpir	3,43	1,8	258	13,3	6
rajčica	3,98	2,01	311	12	6
perad	3,35	1,8	247	6	2
riba	3,43	1,8	243	2	2
govedina	2,51	1,47	172	6	2
svinjetina	2,14	1,34	125	6	2
perad	3,35	1,8	247	-17	-20
riba	3,43	1,8	243	-17	-20
govedina	2,51	1,47	172	-17	-20
svinjetina	2,14	1,34	125	-17	-20

3.4. Toplinsko opterećenje od hlađenja proizvoda

Prilikom proračunavanja potrebnih toplina potrebno je voditi brigu o stanju proizvoda prilikom ulaska u hladionicu ili drugim riječima koje su ulazne temperature i da li je u smrznutom stanju ili ne.

- a) Odvedene topline za hlađenje robe od ulazne temperature do temperature točke zamrzavanja

$$Q_{hl} = m * c_{p1} * (v_1 - v_z) [kJ] \quad (4)$$

$Q_{hl} [kJ]$ - odvedena toplota od proizvoda

$m [kg]$ - masa proizvoda

$c_{p1} [kJ/kgK]$ - specifični toplinski kapacitet proizvoda iznad temperature zamrzavanja

$v_1 [^{\circ}C]$ - ulazna temperatura proizvoda u komoru

$v_z [^{\circ}C]$ - temperatura zamrzavanja proizvoda

- b) Odvedene topline prilikom zamrzavanja proizvoda

$$Q_z = m * h_z [kJ] \quad (5)$$

$h_z [kJ]$ - latentna toplota za zamrzavanje proizvoda

- c) Odvedene topline prilikom pothlađivanja proizvoda od točke smrzavanja do temperature skladištenja duboko smrznute robe

$$Q_{po} = m * c_{p2} * (v_z - v_2) [kJ] \quad (6)$$

$c_{p2} [kJ/kgK]$ - specifični toplinski kapacitet proizvoda ispod temperature zamrzavanja

$v_2 [^{\circ}C]$ - krajnja temperatura proizvoda

Tabela 9 Toplinska opterećenja pojedinih proizvoda nastala prilikom hlađenja

Proizvod	Q_{hl} [kJ]	Q_z [kJ]	Q_{po} [kJ]
Mlijeko	53930,45	-	-
Luk	12444,51	-	-
krastavci	16447,87	-	-
repa	15229,51	-	-
krumpir	15215,70	-	-
rajčica	54417,74	-	-
perad	35315,70	-	-
riba	0,00	-	-
govedina	22680,36	-	-
svinjetina	29005,56	-	-
perad	-	-	53407,62
riba	-	-	53407,62
govedina	-	-	37385,33
svinjetina	-	-	51118,72

Proračun toplinskog opterećenja nastalog uslijed hlađenja proizvoda za pojedine prostorije izračunavaju se na sljedeći način:

$$Q_r = Q_{hl} + Q_z + Q_{po} \text{ [kJ]} \quad (7)$$

Toplinski tok pojedine hladnjače možemo proračunati za pretpostavljeno vrijeme boravka robe u njoj na način:

$$\Phi_r = \frac{Q_r}{\tau} \text{ [kW]} \quad (8)$$

τ [s] - vrijeme boravka robe u hladnjači

Tabela 10 Ukupna toplinska opterećenja nastala uslijed hlađenja proizvoda

Rashladne komore za hlađenje	Toplinsko opterećenje nastalo uslijed hlađenja proizvoda Q_r [kJ]	Vrijeme provedeno u hlađenom prostoru [h]	Toplinski tok ϕ_r [kW]
mlijeka	53930,45	24	0,62
svježeg povrća	113755,34	24	1,32
suhomesnatih proizvoda	87001,62	24	1,01
smrznutih proizvoda	195319,30	24	2,26

3.5. Toplinsko opterećenje od pakiranja proizvoda

Pri proračunu hladnjače potrebno je uzeti u obzir i masu pakiranja proizvoda u kutije i palete jer ona također pridonose toplinskom opterećenju. Masa pakiranja u većini slučajeva iznosi od 2 – 5 % ukupne mase proizvoda, u našem slučaju je odabrano 3,5 % ukupne mase.

Proračunava se na idući način:

Masa pakiranja:

$$m_p = 0,035 * m [kg] \quad (9)$$

Dok toplinsko opterećenje iznosi:

$$Q_{pp} = \frac{m_p * c_{pp} * (v_1 - v_2)}{3600 * \tau} [kW] \quad (10)$$

$Q_{pp} [kW]$ - toplinsko opterećenje od pakiranja

$m_p [kg]$ - masa pakiranja

$c_{pp} [kJ/(kg * K)]$ - specifični toplinski kapacitet pakiranja

Odabrano je da se slaže u kartonske kutije sa specifičnim toplinskim kapacitetom od

$c_{pp} = 1,34 [kJ/(kg * K)]$.

Tabela 11 Ukupna toplinska opterećenja zbog pakiranja

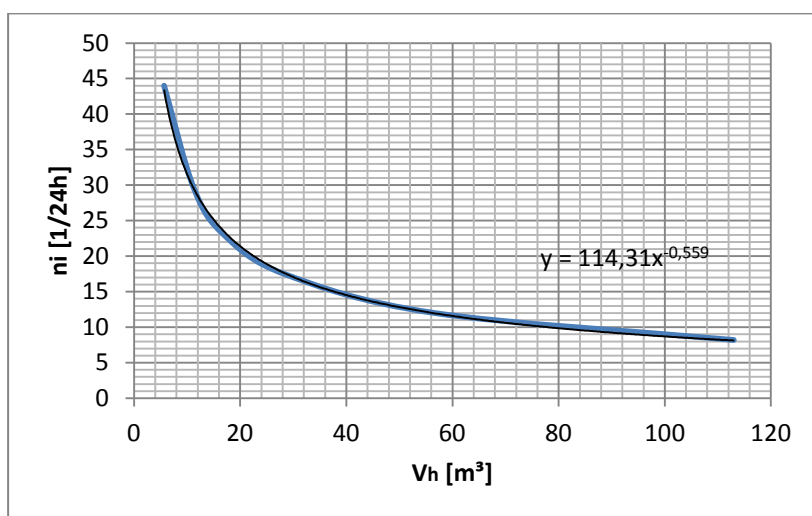
Rashladne komore za hlađenje	Masa pakiranja m_p [kg]	Vrijeme provedeno u hlađenom prostoru τ [h]	Toplinski tok ϕ_{pp} [W]
mlijeka	242,00	24	7,51
svježeg povrća	197,58	24	15,82
suhomesnatih proizvoda	382,15	24	17,98
smrznutih proizvoda	215,11	24	10,01

3.6. Rashladno opterećenje zbog infiltracije zraka

Kada god su vrata od rashladne komore otvorena, ponešto vanjskog, toplijeg zraka izvana ulazi u komoru. Taj zrak mora biti ohlađen na unutrašnju projektnu temperaturu čime se stvara toplinsko opterećenje.

Izračun količine zraka koji infiltracijom ulazi u prostorije provodi se pomoću idućeg dijagrama.

Dijagram 1 Ovisnost broja izmjena zraka o veličini prostora



Broj izmjena zraka po danu iznosi:

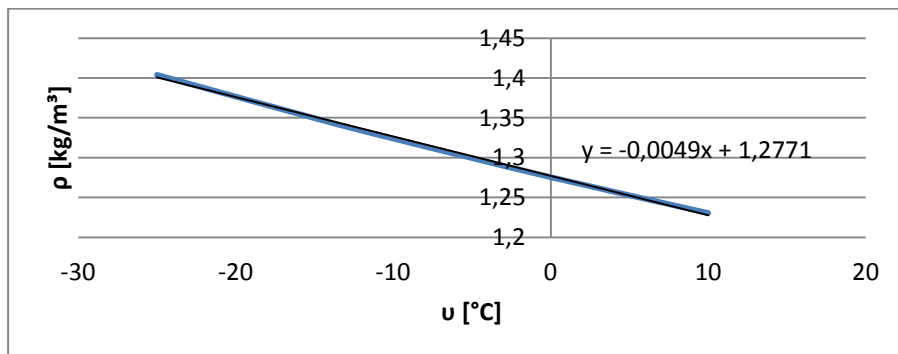
$$n_i = 114,3 * V_h^{-0,55} [1/24h] \quad (11)$$

V_h [m³] - volumen hladnjače

Volumni protok zraka po danu dobiven je preko formule:

$$\dot{V}_i = \frac{n_i * V_h}{24 * 3600} [m^3/s] \quad (12)$$

Osim volumnog protoka potrebno je proračunati i gustoće zraka za različite temperature.

Dijagram 2 Gustoća u ovisnosti o temperaturi

Gustoća ovisno o temperaturi prostorije kreće se prema funkciji

$$\rho = -0,004 * v_2 + 1,277 \quad (13)$$

Rashladno opterećenje proračunava se za temperature u rashladnoj komori $v_2 > 0^\circ\text{C}$ sa jednadžbom

$$\Phi_i = \dot{V}_i * \rho * (h_o - h_i) \text{ [kW]} \quad (14)$$

Kod komore za smrzavanje je $v_2 < 0^\circ\text{C}$ pa se proračunava na sljedeći način:

$$\Phi_i = \dot{V}_i * \rho * [(h_o - h_i) + 0,335 * (x_o - x_i)] \text{ [kW]} \quad (15)$$

h_o [kJ/kg] - entalpija vanjskog zraka

h_i [kJ/kg] - entalpija zraka unutar prostorije

x_o [kg/kg] - udio vlažnosti vanjskog zraka

x_i [kg/kg] - udio vlažnosti zraka unutar prostorije

Tabela 12 Rashladno opterećenje zbog infiltracije

Prostorije	Temp. [°C]	Gustoća zraka ρ [kg/m ³]	entalpija vanjskog zraka h_o [kJ/kg]	entalpija unutrašnjeg zraka h_i [kJ/kg]	vlažnosti vanjskog zraka x_o [g/kg]	vlažnosti unutrašnjeg zraka x_i [kg/kg]	Rashladno opterećenje Φ_i [W]
Mlijeko	5	1,26	39,58	18,75	15,85	5,47	204,96
Povrće	7	1,25	39,58	22,84	15,85	6,29	201,16
Suhomesnati	3	1,27	39,58	14,91	15,85	4,74	309,92
Smrznuti	-19	1,35	39,58	-17,35	15,85	0,71	373,42

3.7. Toplinsko opterećenje od rasvjete

Sva električna energija oslobođena unutar prostora predstavlja toplinsko opterećenje za rashladni uređaj, stoga je i nju potrebno uzeti u obzir prilikom proračuna.

Predani toplinski tok od rasvjete:

$$\Phi_{ras} = \eta_{ras} * A * n_{ras} \text{ [kW]} \quad (16)$$

$A \text{ [m}^2\text{]}$ - površina poda izoliranog skladišta

$n_{ras} \text{ [kW/m}^2\text{]}$ - 0,01 kW/m² uobičajena vrijednost za instaliranu snagu rasvjete po jedinici površine

Stupanj uključenosti η_{ras} određujemo prema vremenu korištenja na način:

$$\eta_{ras} = \frac{\text{broj sati rada}}{24 \text{ sata}} \quad (17)$$

Tabela 13 Toplinsko opterećene od rasvjete

Prostorije	Površina poda izoliranog skladišta A [m ²]	n_{ras} [W/m ²]	broj sati uključenosti rasvjete po danu [h]	Toplinsko opterećenje od rasvjete Φ_{ras} [W]
Mlijeko	17,33	10,00	8	57,75
Povrće	27,40	10,00	8	91,33
Suhomesnati	29,40	10,00	8	98,00
Smrznuti	29,01	10,00	8	96,70

3.8. Toplinsko opterećenje od ljudi

Odavanje topline čovjeka ovisi o stupnju fizičke aktivnosti i uvjeta u prostoru (temperatura, brzina strujanja zraka). Toplinsko opterećenje osobe možemo procijeniti sa jednadžbom koja opisuje ekvivalent topline koju osoba oslobađa pri srednje teškom fizičkom radu

$$q_p = 272 - 6 * v_i [W/osoba] \quad (18)$$

$v_i [^{\circ}C]$ - temperatura hlađenog prostora

Ukupan toplinski tok:

$$\Phi_{ljudi} = \frac{q_p * n_r * \tau_r}{24 * 1000} [kW] \quad (19)$$

$n_r [-]$ - broj ljudi

$\tau_r [h]$ - vrijeme provedeno u hlađenom prostoru

Tabela 14 Toplinsko opterećenje od ljudi

Prostorije	Temperatura prostora $v_i [^{\circ}C]$	Toplina po čovjeku [W]	Vrijeme provedeno u prostoru $\tau_r [h]$	Broj ljudi	Toplinsko opterećenje $\Phi_{ljudi} [W]$
Mlijeko	5	242,00	8	2	161,33
Povrće	7	230,00	8	2	153,33
Suhomesnati	3	254,00	8	2	169,33
Smrznuti	-19	386,00	8	2	257,33

3.9. Toplina disanja proizvoda

Proračun topline disanja proizvoda odnosi se samo na voće i povrće iznad temperature smrzavanja. Podaci o toplini disanja i temperaturama prilikom transporta za određene vrste povrća u našem slučaju su preuzeti iz LTh priručnika.

Toplina disanja:

$$\Phi_d = m * \psi \quad (20)$$

ψ [W/kg] - toplina disanja robe

pri čemu je

$$1 \frac{kcal}{t(24h)} = \frac{4185,5}{1000 * 24 * 3600} = 4,84433 * 10^{-5} \frac{W}{kg}$$

Nakon provedenog proračuna dobili smo sljedeće rezultate:

Tabela 15 Toplinsko opterećenje zbog disanja proizvoda

Svježe povrće	Masa robe [kg]	Temperatura robe prilikom istovara [°C]	kcal/t dan(24h)	ψ [W/kg]	Toplina disanja Φ_d [W]
luk	808,0851064	10	300	0,0145	11,74
krastavci	1012,80	10	2050	0,0993	100,58
repa	937,78	10	470	0,0228	21,35
krumpir	607,68	13,3	330	0,0160	9,71
rajčica	2278,80	12	351	0,0170	38,75
Ukupno:					182,14

3.10. Toplinsko opterećenje uslijed stvaranja inja na isparivaču

Na površinama isparivača kondenzira se i smrzava se vodena para koja se nalazi u zraku prostorije. Para u zraku nastaje prilikom kaliranja robe u komorama za hlađenje smrznutih i suhomesnatih proizvoda, te stvara dodatno toplinsko opterećenje. Proračun toplinskih opterećenja vrši se na način da prvo odredimo masu vlage koja je prilikom kaliranja isparila u obliku pare. Masa vlage otpuštena prilikom kaliranja za ohlađivanje mesa iznosi 1% ukupne mase za razdoblje od 5 dana ili u našem slučaju za 1 dan.

Masa vlage:

$$m_k = \frac{m}{100 \cdot 5} [kg] \quad (21)$$

Dobiveni podaci

Tabela 16 Masa vlage nastala kaliranjem

Prostorije za skladištenje	Masa proizvoda [kg]	Masa vlage nastala kaliranjem [kg]
Suhomesnati proizvodi	10918,5	21,83
Smrznuti proizvodi	6146,11	12,29

Toplinsko opterećenje proračunava se:

$$Q_{inja} = m_k(h_j - h_s)[kJ] \quad (22)$$

entalpija vlage u obliku leda na temperaturi na koju se ohlađuje proizvod:

$$h_j = -(r_{sw} - c_s v_i) [kJ/kg] \quad (23)$$

$v_i [^{\circ}C]$ -temperatura unutar rashladne komore

$r_{sw} = 334 [kJ/kg]$ -toplina smrzavanja leda

$c_s = 2,09 [kJ/kg]$ -specifični toplinski kapacitet leda

entalpija vlage u obliku leda na temperaturi isparivanja:

$$h_j = -(r_{sw} - c_s v_{isp}) [kJ/kg] \quad (24)$$

$v_{isp} [^{\circ}C]$ -temperatura na izlazu iz isparivača

Toplinski tok

$$\Phi_{inje} = \frac{Q_{inja}}{24 \cdot 3600} [kW] \quad (25)$$

Dobivene vrijednosti nakon proračuna:

Tabela 17 Toplinsko opterećenje zbog kaliranja

Prostorije za skladištenje	h_j [kJ/kg]	h_o [kJ/kg]	Temperatura u komori [$^{\circ}C$]	Temperatura na isparivaču [$^{\circ}C$]	Toplinsko opterećenje uslijed stvaranja inja na isparivaču [kJ]	Toplinski tok Φ_{inje} [W]
Suhomesnati proizvodi	-329,8	-340,3	2	-3	228,20	2,64
Smrznuti proizvodi	-375,8	-386,3	-20	-25	128,45	1,48

3.11. Toplinsko opterećenje od elektromotora isparivača

Toplinsko opterećenje od elektromotora isparivača ne može se točno odrediti dok nije poznat pad tlaka i protok zraka kroz isparivač. Ako je poznato toplinsko opterećenje možemo pretpostaviti da je približno jednako električnoj snazi ventilatora.

$$\Phi_{EM} \leq P_{EM}$$

Te se toplinsko opterećenje od elektromotora može približno izračunati pomoću:

$$\Phi_{EM} = f * \Phi_p [W] \quad (26)$$

$f = 0,05$ -faktor za procjenu rada ventilatora (preuzeto iz tablice Skripte
projektiranje rashladnih sustava str.33 za način skladištenja u hladnom)

Procijenjeno toplinsko opterećenje izračunava se na način da se zbroje sva opterećenja:

$$\Phi_p = \Phi_{tr} + \Phi_r + \Phi_d + \Phi_{pp} + \Phi_i + \Phi_{rasv} + \Phi_{ljudi} + \Phi_{inje} [W] \quad (27)$$

Tabela 18 Toplinska opterećenja prostorija

Rashladne komore za hlađenje	Mlijeko	Povrće	Suhomesnati proizvodi	Smrznuti proizvodi
Transmisijski gubici $\phi_{tr}[W]$	312,05	283,56	360,30	893,30
Hlađenje i smrzavanje proizvoda ϕ_r [W]	624,20	1316,61	1006,96	2260,24
Toplina disanja $\phi_d [W]$	0	182,14	0	0
Pakiranje proizvoda ϕ_{pp} [W]	7,51	15,82	17,98	10,01
Rashladno opterećenje $\Phi_i[W]$	204,96	201,16	309,92	373,42
Opterećenje od rasvjete $\Phi_{rasv}[W]$	57,75	91,33	98,00	96,70
Opterećenje od ljudi $\Phi_{ljudi}[W]$	161,33	153,33	169,33	257,33
Kaliranje proizvoda $\Phi_{inje}[W]$	0	0	2,64	1,48
Procijenjeno toplinsko opterećenje Φ_p [W]	1055,74	1960,40	1602,20	2997,70

Ukupno toplinsko opterećenje dobiva se nakon što pribrojimo:

$$\Phi_u = \Phi_p + \Phi_{EM} [W] \quad (28)$$

Tabela 19 Ukupna toplinska opterećenja

Prostorije	Procijenjeno toplinsko opterećenje $\Phi_p[W]$	Toplinsko opterećenje od elektromotora $\Phi_{EM}[kW]$	Ukupno toplinsko opterećenje Φ_u [W]
Mlijeko	1055,74	52,79	1108,53
Povrće	1960,40	98,02	2058,42
Suhomesnati	1602,20	80,11	1682,31
Smrznuti	2997,70	149,89	3147,59

3.12. Vršno toplinsko opterećenje

Rashladni učinak uređaja za hlađenje i njegovih komponenti određuje se tako da se tijekom dana zadovolje potrebe za hlađenjem u vremenu kraćem od 24 sata, dok ostalo vrijeme za potrebe poslova oko redovnog održavanja instalacije, otapanjeinja s isparivača, rezerve kapaciteta u slučaju kvara ili neočekivanog velikog toplinskog opterećenja. Uređaji predviđeni za komercijalnu upotrebu imaju internirajući režim rada od 12-16 h te na temelju toga možemo izračunati vršno opterećenje:

$$\Phi_e = \Phi_u * \frac{24}{\tau_e} [W] \quad (29)$$

$\tau_e = 14[h]$ -režim rada komercijalnih rashladnih uređaja

Vršna opterećenja rashladnih komora su tablično prikazana:

Tabela 20 Opterećenja pomoću kojih ulazim u proračun

Prostorije	Vršno opterećenje Φ_e [W]
Mlijeko $\Phi_{i,mlijeko+}[W]$	1900,34
Povrće $\Phi_{i,povrće+}[W]$	3528,72
Suhomesnati $\Phi_{i,suh.mes+}[W]$	2883,97
Smrznuti $\Phi_{i,-}[W]$	5395,86

4. PRORAČUN KOMPONENTI RASHLADNOG UREĐAJA

Podaci o svojstvima R404A preuzeti su iz podloga „Radne tvari u Tehnici hlađenja“.

Proračun izveden za $v_{ok} = 35^{\circ}\text{C}$

Temperatura kondenzacije

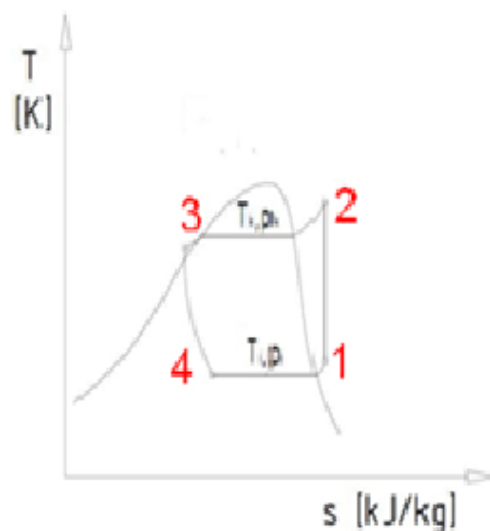
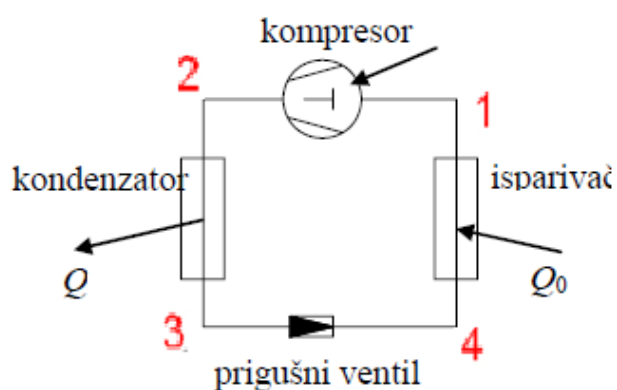
$$v_k = v_{ok} + 10^{\circ}\text{C} \quad (30)$$

Temperatura pothlađene kapljevine

$$v_3 = v_k - 3^{\circ}\text{C} \quad (31)$$

Temperatura pregrijana

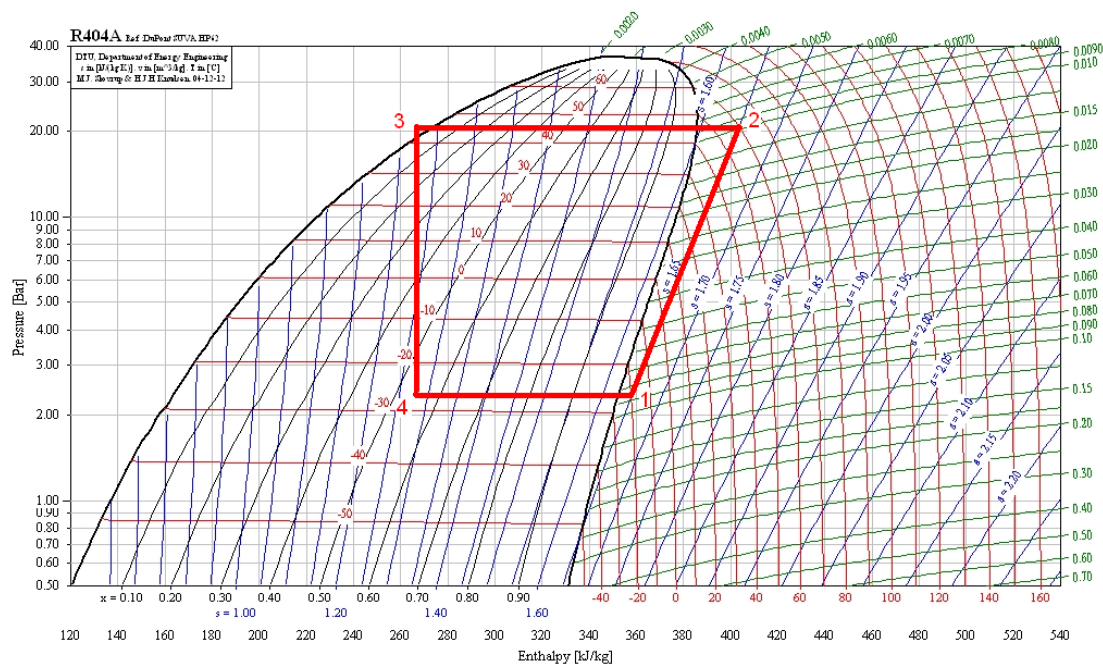
$$v_1 = v_i + 5^{\circ}\text{C} \quad (32)$$



Slika 3 Shematski prikaz rashladnog procesa

Karakteristične točke rashladnog procesa koje smo dobili nakon definiranja radnih parametara uz pomoć dijagrama i tablica za R404A. Dobivene vrijednosti su prikazane za plus i minus režim .

4.1. Minus režim



Slika 4 Karakteristične točke minus režima

Tabela 21 Karakteristične točke minus režima

Karakteristične točke	Tlakovi [bar]	Temperatura [°C]	entalpija [kJ/kg]	entropija [kJ/kgK]
1	2,0449	-25	355	1,65
2	20,4725	60	406	1,65
3	20,4725	42	264,1	-
4	2,0449	-30	264,1	-

Iz očitanih vrijednosti izračunavamo podatke za minus režim hlađenja

Zadan potreban učin isparivača:

$$\Phi_{i-} = 5,395 \text{ [kW]} \quad (33)$$

Specifični rashladni učin:

$$q_o = h_1 - h_4 = 355 - 264,1 = 90,9 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (34)$$

Protok radne tvari:

$$g_{mR404A-} = \frac{\Phi_{i-}}{q_o} = \frac{5,395}{90,1} = 0,0593 \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (35)$$

Specifični toplinski kapacitet R404A:

$$c_p = 835 \left[\frac{J}{kgK} \right]$$

Specifični učin kondenzacije:

$$q_k = h_2 - h_3 = 406 - 264,1 = 141,9 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (36)$$

Učin kondenzatora:

$$\Phi_{kon-} = g_{mR404A-} * q_k = 8,42 [kW] \quad (37)$$

Specifični rad:

$$w = q_k - q_o = 141,9 - 90,9 = 51 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (38)$$

Snaga kompresora:

$$P_k = \Phi_{kon-} - \Phi_{i-} = 8,42 - 5,39 = 3,03 [kW] \quad (39)$$

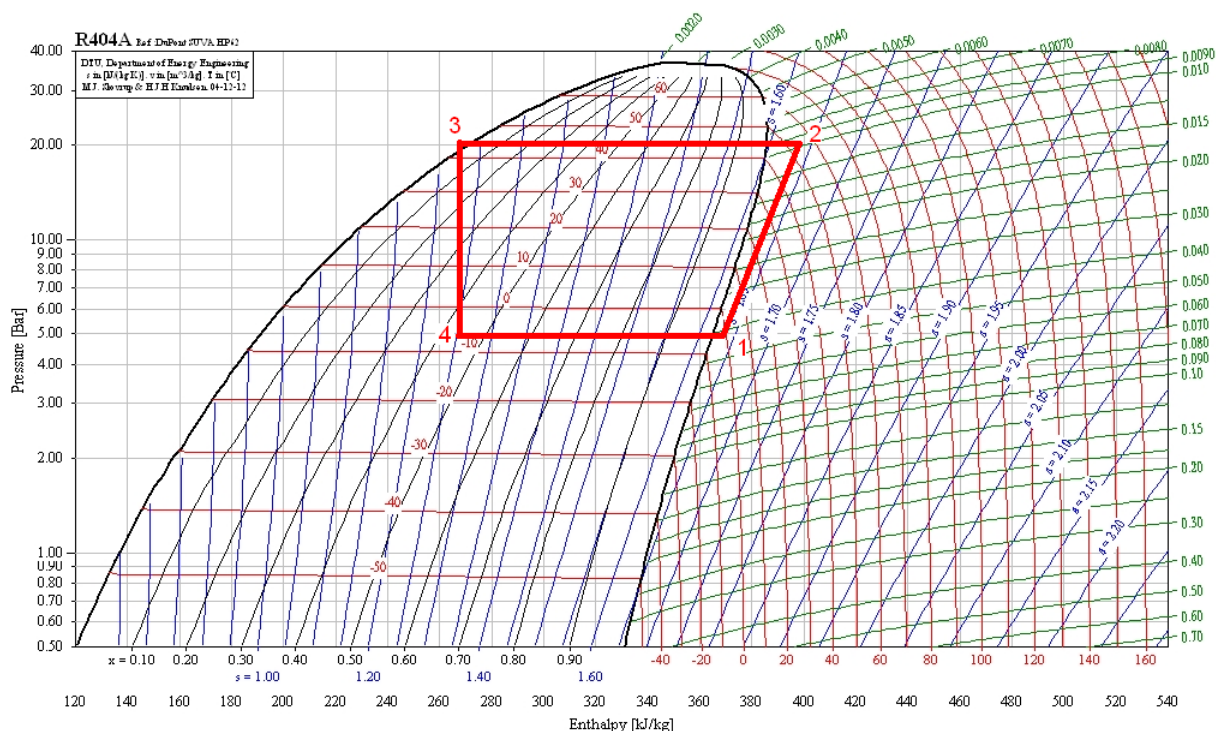
Snaga kompresora uvećana za faktor 1,4:

$$P = 1,4 * P_k = 4,24 [kW] \quad (40)$$

Potreban učin kondenzatora:

$$\Phi_{k-} = P + \Phi_{i-} = 4,24 + 5,39 = 9,63 [kW] \quad (41)$$

4.2. Plus režim



Slika 5 Karakteristične točke plus režima

Plus režim rada se sastoji od tri isparivača i jednog kondenzatora.

Iz razloga što su karakteristične točke jednake, prikazujemo ih pomoću tablice.

Tabela 22 Karakteristične točke plus režima

Karakteristične točke	Tlakovi [bar]	Temperatura [°C]	entalpija [kJ/kg]	entropija [kJ/kgK]
1	4,97	-1	368	1,63
2	20,47	54	397	1,63
3	20,47	42	264	-
4	4,97	-6	264	-

Ukupan potreban učin isparivača jednak je zbroju toplinskih opterećenja sve tri komore:

$$\begin{aligned}
 \Phi_{i+} &= \Phi_{i,mlijeko+} + \Phi_{i,povrće+} + \Phi_{i,suho.mes+} = \\
 &= 1,9 + 3,52 + 2,88 = 8,31[kW]
 \end{aligned}
 \tag{41}$$

Zadano potreban učinak isparivača:

$$\Phi_{i+} = 8,31 [kW]$$

Specifični rashladni učin:

$$q_o = h_1 - h_4 = 368 - 264 = 104 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (42)$$

Protok radne tvari:

$$g_{mR404A+} = \frac{\Phi_{i-}}{q_o} = \frac{8,31}{104} = 0,07992 \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (41)$$

Specifični toplinski kapacitet R404A:

$$c_p = 835 \left[\frac{J}{kgK} \right]$$

Specifični učin kondenzacije:

$$q_k = h_2 - h_3 = 397 - 264 = 133 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (41)$$

Učin kondenzatora:

$$\Phi_{kon+} = g_{mR404A+} * q_k = 10,63 [kW] \quad (42)$$

Specifični rad:

$$w = q_k - q_o = 133 - 104 = 29 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (43)$$

Snaga kompresora:

$$P_k = \Phi_{kon+} - \Phi_{i+} = 10,63 - 8,31 = 2,31 [kW] \quad (44)$$

Snaga kompresora uvećana za faktor 1,4:

$$P = 1,4 * P_k = 3,24 \text{ [kW]} \quad (45)$$

Potreban učin kondenzatora:

$$\Phi_{k+} = P + \Phi_{i+} = 3,24 + 8,31 = 11,55 \text{ [kW]} \quad (46)$$

4.3. Dimenzioniranje isparivača komore za skladištenje smrznutih proizvoda

Proračun dimenzija isparivača je izveden prema ulaznim parametrima zadanim od strane projektanta za predviđene uvjete rada:

$$\Phi_{i-} = 5,395 [kW]$$

Ulazna temperatura zraka isparivača:

$$t_{a1} = -19 [^{\circ}C]$$

Izlazna temperatura zraka isparivača:

$$t_{a2} = -22,6 [^{\circ}C]$$

Temperatura isparivanja:

$$t_e = -30 [^{\circ}C]$$

Temperatura kondenzacije:

$$t_c = 45 [^{\circ}C]$$

Iskustveno odabrane početne vrijednosti konstrukcije za daljnji proračun su:

Vanjski promjer cijevi:

$$d_e = 12 [mm]$$

Unutarnji promjer cijevi:

$$d_i = 10 [mm]$$

Razmak između cijevi u vertikalnom smjeru:

$$s_1 = 28 [mm]$$

Razmak između cijevi u horizontalnom smjeru:

$$s_2 = 28 [mm]$$

Postavljen je šahovski raspored bakrenih cijevi unutar isparivača dok su rebra izrađena od aluminijske.

Razmak između lamela:

$$s_f = 8 [mm]$$

Debljina lamela:

$$f_t = 0,4 \text{ [mm]}$$

Broj redova:

$$i_r = 6$$

Broj cijevi u jednom redu:

$$i_t = 14$$

Broj ulaznih cijevi (krugova):

$$i_{in} = 7$$

Proračun potrebne površine za metar duljine cijevi sa lamelama

Vanjska površina cijevi između rebara:

$$A_{mt} = \pi * d_e * \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) = 0,03581 \left[\frac{m^2}{m}\right] \quad (47)$$

Površina rebara:

$$A_f = \frac{2 * (s_1 * s_2 - \frac{\pi * d_e}{4})}{s_f} = 0,16772 \left[\frac{m^2}{m}\right] \quad (48)$$

Površina za izmjenu topline na vanjskoj strani po metru duljine:

$$A_{el} = A_{mt} + A_f = 0,20353 \left[\frac{m^2}{m}\right] \quad (49)$$

Površina za izmjenu topline na unutarnjoj strani po metru duljine:

$$A_{il} = \pi * d_i = 0,031416 \left[\frac{m^2}{m}\right] \quad (50)$$

Odnos između vanjske i unutarnje površine za izmjenu topline:

$$\beta = \frac{A_{el}}{A_{il}} = 6,4788 \quad (51)$$

Visina izmjenjivača topline:

$$H = i_t * s_1 = 0,392 \text{ [m]} \quad (52)$$

Dubina izmjenjivača topline:

$$L = i_r * s_2 = 0,168 [m] \quad (53)$$

Logaritamska razlika temperature:

$$\Delta t_m = \frac{t_{a1}-t_{a2}}{\ln \frac{t_{a1}-t_e}{t_{a2}-t_e}} = -9,08 [^{\circ}C] \quad (54)$$

Srednja vrijednost temperature zraka:

$$t_{am} = t_e + \Delta t_m = -20,92 [^{\circ}C] \quad (55)$$

Termodinamička svojstva zraka za t_{am} :

Gustoća zraka

$$\rho_a = 1,38 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Specifični toplinski kapacitet

$$c_a = 1,004 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Toplinska vodljivost

$$\lambda_a = 1,004 \left[\frac{W}{mK} \right]$$

Kinematička viskoznost

$$\nu_a = 1,329 * 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari

Protok rashladnog sredstva:

$$g_{mR404A-} = \dot{m}_{R-} = 0,0593 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Brzina protoka zraka u cijevima:

$$G = \frac{\dot{m}_{R-}}{\frac{i_{in} * d_i^2 * \pi}{4}} = 107,97 \left[\frac{kg}{m^2 s} \right] \quad (56)$$

Pretpostavljeno je mjehurićasto vrenje (Ciconkov str.126 tabl.7-1) u cijevima te je izveden proračun po toj pretpostavci

Odabran koeficijent C za $t_{am} = -20,92 [^{\circ}C]$ iznosi:

$$C = 0,164$$

Pretpostavljen toplinski tok:

$$q_{ip} = 3173,5 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Izračunat koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_R = C * \frac{G^{0,1} * q_i^{0,7}}{d_i^{0,5}} = 740,03 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (57)$$

Toplinska otpornost uslijed naslaga na strani zraka:

$$R_o = 0,0005 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

Toplinska otpornost zbog stvaranja naslaga na strani rashladnog sredstva:

$$R_i = 0 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

Debljina cijevi:

$$\delta_t = 0,001 [m]$$

Toplinska vodljivost bakra:

$$\lambda_t = 370 \left[\frac{W}{m K} \right]$$

Toplinska otpornost materijala cijev:

$$R_t = \frac{\delta_t}{\lambda_t} = 2,7027 * 10^{-6} \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (58)$$

Srednji promjer cijevi:

$$d_m = d_i + \frac{d_e - d_i}{2} = 11 [mm] \quad (59)$$

Temperatura na vanjskoj strani isparivača:

$$t_s = t_e + \left(\frac{1}{\alpha_R} + R_i + R_t * \frac{d_i}{d_m} + R_o * \frac{1}{\beta} \right) * q_{ip} = -24,99 [^{\circ}C] \quad (60)$$

Entalpija zraka na ulazu u isparivač:

$$h_{a1} = c_a * t_{a1} = -19,083 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (61)$$

Entalpija zraka na izlazu isparivača:

$$h_{a2} = c_a * t_{a2} = -22,699 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (62)$$

Površina izmjene topline:

$$A_i = \frac{\Phi_{i-}}{q_{ip}} = 1,7003 [m^2] \quad (63)$$

Ukupna duljina cijevi:

$$L_{ov} = \frac{A_i}{A_{il}} = 54,12 [m] \quad (64)$$

Duljina cijevi u jednom redu:

$$L_1 = \frac{L_{ov}}{i_r} = 9,02 [m] \quad (65)$$

Širina izmjenjivača topline:

$$B = \frac{L_1}{i_t} = 0,6443 [m] \quad (66)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka

Protok suhog zraka kroz isparivač:

$$\dot{m}_a = \frac{\Phi_{i-}}{h_{a1} - h_{a2}} = 1,4922 \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (67)$$

Volumenski protok zraka kroz isparivač:

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a} = 1,0813 \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (68)$$

Najmanja površina između cijevi i lamela za strujanje zraka :

$$A_z = L_1 * (s_1 - d_e) * \left(1 - \frac{f_t}{s_f} \right) = 0,1371 [m^2] \quad (69)$$

Brzina protoka u najmanjem presjeku:

$$w = \frac{\dot{V}_a}{A_z} = 7,887 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (70)$$

Nusselt-ov broj:

Za odabir pravilne jednadžbe moramo poštivati njezine pretpostavke pri proračunu.

Odabrana je jednadžba:

$$Nu = C * C_r * C_s * \left(\frac{d_e}{s_f} \right)^{-0,54} * \left(\frac{h}{s_f} \right)^{-0,14} * Re^n \quad (71)$$

Pri čemu se mora zadovoljiti uvjet:

$$\frac{s_f}{d_e} = 0,66 > 0,35$$

Za cijevi postavljene u šahovski raspored odabrani koeficijenti (Ciconkov str.154.tab.)

$$C = 0,23$$

$$n = 0,65$$

Koeficijent C_r odabire se prema broju redova i_r

$$i_r = 6 \rightarrow C_r = 0,98$$

Koeficijent C_s :

$$s_{2d} = \sqrt{\left(\frac{s_1}{2}\right)^2 + s_2^2} = 0,0313 \quad (72)$$

$$C_s = \left(\frac{s_1 - d_e}{s_{2d} - d_e}\right)^{0,2} = 0,96314 \quad (73)$$

Visina lamela:

$$h = \frac{s_1 - d_e}{2} = 8 [mm] \quad (74)$$

Ekvivalentan promjer:

$$d_{eqv} = \frac{(s_1 - d_e) * (s_f - f_t)}{s_1 - d_e + s_f - f_t} = 0,0103 [m] \quad (75)$$

Reynolds-ov broj:

$$Re = \frac{w * d_{eqv}}{\nu_a} = 6115,54 \quad (76)$$

Pa je Nusselt-ov broj:

$$Nu = 50,43$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka

$$\alpha_a = \frac{Nu * \lambda_a}{d_{eqv}} = 109,35 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (77)$$

Za šahovski raspored cijevi množimo koeficijentom 1,1:

$$\alpha_{aw} = 1,1 * \alpha_a = 120,29 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (78)$$

Toplinska vodljivost aluminija:

$$\lambda_f = 209 \left[\frac{W}{m K} \right]$$

Koeficijenti :

$$m_f = \sqrt{\frac{2 * \alpha_{aw}}{\lambda_f * f_t}} = 53,64 \left[\frac{1}{m} \right] \quad (79)$$

$$A_f = s_1 = 0,028 [m]$$

$$B_f = \sqrt{(s_1/2)^2 + s_2^2} = 0,0313 [m] \quad (80)$$

$$\rho_f = 1,27 * \left(\frac{B_f}{d_e}\right) * \sqrt{\frac{A_f}{B_f}} = 2,5543 \quad (81)$$

$$h_f = 0,5 * d_e * (\rho_f - 1) * (1 + 0,35 * \ln \rho_f) = 0,01238 [m] \quad (82)$$

Efikasnost lamela:

$$E = \frac{th(m_f * h_f)}{m_f * h_f} = 0,8748 \quad (83)$$

Koeficijent otpornosti kontakta između cijevi i lamela:

$$C_k = 1$$

Koeficijent prijelaza topline vezan na unutrašnji promjer cijevi:

$$\alpha_{ai} = \frac{\alpha_{aw} * (A_f * E * C_k + A_{mt})}{A_{il}} = 698,96 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (84)$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline:

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ai}} + R_o * \frac{1}{\beta} + R_t * \frac{d_i}{d_m} + R_i + \frac{1}{\alpha_R}} = 349,45 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (85)$$

Stvarni toplinski tok :

$$q_i = k_i * \Delta t_m = 3173,52 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (86)$$

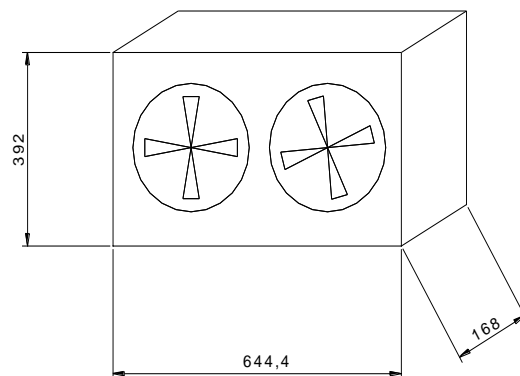
Približno je jednak pretpostavljenom pa nema potrebe za ponovnim računom.

Brzina struje zraka na ulazu u isparivač:

$$w_f = \frac{\dot{V}_a}{(B * H)} = 4,28 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (87)$$

Pad tlaka zraka na isparivaču:

$$\Delta p = 0,2333 * i_R * \left[\frac{s_2}{s_f - f_t} \right]^{0,42} * (w * \rho_a)^{1,8} = 177,66 [Pa] \quad (88)$$



Visina izmjenjivaca $H = 392 \text{ mm}$
Širina izmjenjivaca $B = 644,4 \text{ mm}$
Dubina izmjenjivaca $H = 168 \text{ mm}$

Slika 6 Dimenzije isparivača

4.4. Dimenzioniranje kondenzatora komore za skladištenje smrznutih proizvoda

Toplinsko opterećenje kondenzatora:

$$Q_c = \Phi_{k-} = 9,634 \text{ [kW]}$$

Temperatura zraka u okoliša:

$$t_o = t_1 = 35 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Temperatura kondenzacije:

$$t_c = 45 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Logaritamska temperaturna razlika:

$$\Delta t_m = \frac{(t_c - t_1) - (t_c - t_2)}{\ln \frac{t_c - t_1}{t_c - t_2}} = 5,81$$

Srednja vrijednost temperature zraka:

$$t_m = t_c - \Delta t_m = 39,19 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Termodinamička svojstva zraka za t_m :

Gustoća zraka

$$\rho_a = 1,1333 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Specifični toplinski kapacitet

$$c_a = 1,005 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Toplinska vodljivost

$$\lambda_a = 0,02743 \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$$

Kinematička viskoznost

$$\nu_a = 1,681 * 10^{-5} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Iskustveno odabrane početne vrijednosti konstrukcije za daljnji proračun su:

Vanjski promjer cijevi:

$$d_e = 12 \text{ [mm]}$$

Unutarnji promjer cijevi:

$$d_i = 10 [mm]$$

Razmak između cijevi u vertikalnom smjeru:

$$s_1 = 31,75 [mm]$$

Razmak između cijevi u horizontalnom smjeru:

$$s_2 = 27,5 [mm]$$

Šahovski raspored postavljanja cijevi sa aluminijskim rebrima.

Razmak između lamela:

$$s_f = 2 [mm]$$

Debljina lamela:

$$f_t = 0,15 [mm]$$

Broj redova:

$$i_r = 4$$

Broj cijevi u jednom redu:

$$i_t = 24$$

Broj ulaznih cijevi (krugova) :

$$i_{in} = 8$$

Proračun potrebne površine za metar duljine cijevi sa lamelama

Vanjska površina cijevi između rebara:

$$A_{mt} = \pi * d_e * \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) = 0,0348 \left[\frac{m^2}{m}\right]$$

Površina rebara:

$$A_f = \frac{2 * \left(s_1 * s_2 - \frac{\pi * d_e^2}{4}\right)}{s_f} = 0,76 \left[\frac{m^2}{m}\right]$$

Površina za izmjenu topline na vanjskoj strani po metru duljine:

$$A_{el} = A_{mt} + A_f = 0,7948 \left[\frac{m^2}{m}\right]$$

Površina za izmjenu topline na unutarnjoj strani po metru duljine:

$$A_{il} = \pi * d_i = 0,03141 \left[\frac{m^2}{m} \right]$$

Odnos između vanjske i unutarnje površine za izmjenu topline:

$$\beta = \frac{A_{el}}{A_{il}} = 25,3$$

Visina izmjenjivača topline:

$$H = i_t * s_1 = 0,762 [m]$$

Dubina izmjenjivača topline:

$$L = i_r * s_2 = 0,11 [m]$$

Termodinamička svojstva R404A za stanja vrele kapljevine na temperaturi 50 °C:

Gustoća

$$\rho_l = 900,7 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Specifični toplinski kapacitet

$$c_l = 1,949 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Toplinska vodljivost

$$\lambda_l = 0,0567 \left[\frac{W}{mK} \right]$$

Kinematička viskoznost

$$\nu_l = 9,417 * 10^{-8} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

Entalpija kapljevine

$$h_l = 277,38 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Termodinamička svojstva R404A suhozasićenog stanja na temperaturi 50 °C:

Gustoća

$$\rho_v = 137,17 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Specifični toplinski kapacitet

$$c_v = 1762 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Toplinska vodljivost

$$\lambda_v = 0,02303 \left[\frac{W}{mK} \right]$$

Kinematička viskoznost

$$\nu_v = 1,078 * 10^{-7} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

Entalpija kapljevine

$$h_v = 381,27 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Protok rashladnog sredstva:

$$\dot{g}_{mR404A-} = \dot{m}_{R-} = 0,05936 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Brzina protoka zraka u cijevima:

$$G = \frac{\dot{m}_{R-}}{\frac{i_{in} * d_i^2 * \pi}{4}} = 94,47 \left[\frac{kg}{m^2 s} \right]$$

Pretpostavljeni ukupni koeficijent prijelaza topline:

$$k_{ep} = 16,04 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Specifični toplinski tok po površini:

$$q_e = k_{ep} * \Delta t_m = 93,25 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Specifični toplinski tok vezan uz unutrašnju površinu prijelaza topline :

$$q_i = q_e * \beta = 2359,64 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Površina izmjene topline:

$$A_i = \frac{Q_c}{q_i} = 4,08 [m^2]$$

Ukupna duljina cijevi:

$$L_{ov} = \frac{A_i}{A_{il}} = 129,96 [m]$$

Duljina cijevi u jednom redu:

$$L_1 = \frac{L_{ov}}{i_r} = 32,49 [m]$$

Širina izmjenjivača topline:

$$B = \frac{L_1}{i_t} = 1,353 [m]$$

Najmanja površina između cijevi i lamela za strujanje zraka :

$$A_z = L_1 * (s_1 - d_e) * \left(1 - \frac{f_t}{s_f}\right) = 0,5935 [m^2]$$

Brzina protoka u najmanjem presjeku:

$$w = \frac{\dot{V}_a}{A_z} = 2,03 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka

Ekvivalentan promjer:

$$d_{eqv} = \frac{(s_1 - d_e) * (s_f - f_t)}{s_1 - d_e + s_f - f_t} = 0,003383 [m]$$

Reynolds-ov broj:

$$Re = \frac{w * d_{eqv}}{\nu_a} = 409,72$$

Koeficijenti n i m:

$$n = 0,45 + 0,0066 * \left(\frac{L}{d_{eqv}}\right) = 0,664 \quad (89)$$

$$m = -0,28 + 0,08 * \left(\frac{Re}{1000}\right) = -0,247 \quad (90)$$

Koeficijent C_1 :

$$C_1 = C_{1A} * C_{1B} = 0,1514 \quad (91)$$

Gdje C_{1A} ovisi o omjeru $L/d_{eqv} = 32$ preuzetom iz Ciconkov str.108

$$C_{1A} = 0,12$$

$$C_{1B} = 1,36 - 0,24 * \left(\frac{Re}{1000}\right) = 1,26 \quad (92)$$

Nusselt-ov broj:

$$Nu = C_1 * Re^n * \left(\frac{L}{d_{eqv}}\right)^m = 3,487 \quad (93)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani zraka:

$$\alpha_a = \frac{Nu * \lambda_a}{d_{eqv}} = 28,28 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Za šahovski raspored množimo sa faktorom uvećanja 1,1:

$$\alpha_{aw} = 1,1 * \alpha_a = 31,1 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Toplinska vodljivost aluminija

$$\lambda_f = 209 \left[\frac{W}{m K} \right]$$

Koeficijenti:

$$m_f = \sqrt{\frac{2 * \alpha_{aw}}{\lambda_f * f_t}} = 44,54 \left[\frac{1}{m} \right]$$

$$A_f = s_1 = 0,03175 [m]$$

$$B_f = \sqrt{(s_1/2)^2 + s_2^2} = 0,03175 [m]$$

$$\rho_f = 1,27 * \left(\frac{B_f}{d_e}\right) * \sqrt{\frac{A_f}{B_f}} = 2,811$$

$$h_f = 0,5 * d_e * (\rho_f - 1) * (1 + 0,35 * \ln \rho_f) = 0,0148 [m]$$

Efikasnost lamela:

$$E = \frac{th(m_f * h_f)}{m_f * h_f} = 0,8765$$

Koeficijent otpornosti kontakta između cijevi i lamela:

$$C_k = 0,99$$

Koeficijent prijelaza topline vezan na unutrašnji promjer cijevi:

$$\alpha_{ai} = \frac{\alpha_{aw} * (A_f * E * C_k + A_{mt})}{A_{il}} = 687,55 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Prijenos topline na strani rashladnog medija

Koeficijent prijenosa topline na strani rashladnog medija (kondenzacija u cijevi).

Reynoldsov broj za zasićenu tekućinu:

$$Re_l = \frac{w_l * d_l}{\nu_l} = 11138$$

Odabiremo jednadžbu za proračun Nusselta prema uvjetima da je:

$$Re_l > 5000$$

$$Re_l * \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{0,5} = 28\,541 > 20\,000 \quad (94)$$

Prantlov broj zasićene tekućine:

$$Pr_l = \frac{c_l * \eta_l}{\lambda_l} = 2,9156 \quad (95)$$

Nusseltov broj:

$$Nu = 0,026 * Pr_l^{1/3} * [Re_l * \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{0,5} + Re_l]^{0,8} = 177,31 \quad (96)$$

Koeficijent prijenosa topline na rashladnoj strani:

$$\alpha_R = \frac{Nu * \lambda_l}{d_i} = 1005,35 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Toplinska otpornost uslijed naslaga na strani zraka:

$$R_o = 0,0003 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

Toplinska otpornost uslijed stvaranja naslaga na strani rashladnog sredstva:

$$R_i = 0 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

Debljina cijevi:

$$\delta_l = 0,001 [m]$$

Toplinska vodljivost bakra:

$$\lambda_t = 370 \left[\frac{W}{m K} \right]$$

Toplinska otpornost do materijala cijev:

$$R_t = \frac{\delta_t}{\lambda_t} = 2,7027 * 10^{-6} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

Srednji promjer cijevi:

$$d_m = d_i + \frac{d_e - d_i}{2} = 11 \text{ [mm]}$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline (vezan na unutrašnju površinu za izmjenu topline) :

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ai}} + R_i + R_t * \frac{d_i}{d_m} + R_o * \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha_R}} = 405,94 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline (vezan na vanjsku površinu za izmjenu topline) :

$$k_e = \frac{k_l}{\beta} = 16,043 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Vanjska površina za izmjenu topline:

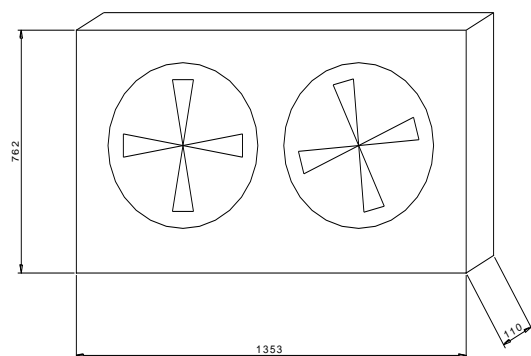
$$A_e = A_i * \beta = 103,3 \text{ [m}^2\text{]}$$

Brzina struje zraka na ulazu u kondenzator:

$$w_f = \frac{\dot{V}_a}{(B * H)} = 1,17 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Pad tlaka zraka na kondenzatoru:

$$\Delta p = 0,2333 * i_R * \left[\frac{s_2}{s_f - f_t} \right]^{0,42} * (w * \rho_a)^{1,8} = 13,04 \text{ [Pa]}$$



Visina izmjenjivaca $H = 762 \text{ mm}$
Širina izmjenjivaca $B = 1353 \text{ mm}$
Dubina izmjenjivaca $H = 110 \text{ mm}$

Slika 7 Dimenzije kondenzatora

4.5. Proračun cjevovoda

Proračun cjevovoda izvodimo posebno za minus režim a posebno za plus režim.

Brzine strujanja R404A u cijevima odabirem iz skripte „Hlađenje i dizalice topline“ Str.114
Tab.7.1

Tabela 23 Karakteristične brzine strujanja radne tvari u cijevima

Radna tvar	Uisni vod	Tlačni vod	Kapljevinski vod
Freoni	8÷12	10÷15	0,4÷1,2
R717	10÷20	15÷25	0,5÷1,2
R718	-	-	0,5÷1,5
PPE	-	-	0,3÷0,8

Prema odabranim brzinama strujanja za pojedine vodove proračunavamo:

Volumni protok R404A kroz cjevovod:

$$g_{vR404A} = \frac{g_{mR404A}}{\rho_{R404A}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (97)$$

Poprečni presjek:

$$A = \frac{g_{vR404A}}{w} [m^2] \quad (98)$$

Promjer cjevovoda proračunat:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} * 1000 [mm] \quad (99)$$

Formule za proračun cjevovoda su korištene u oba slučaja jednako.

Minus režim**Tabela 24 Odabir dimenzija cjevovoda minus režim**

Vodovi	Usisni	Tlačni	Kapljevinski
Odabrane brzine strujanja w [m/s]	10,5	12,5	0,8
Temperatura [°C]	-25	60	42
Gustoća ρ_{R404A} [kg/m ³]	12,91	192,3	953,92
Volumni protok q_{vR404A} [m ³ /s]	0,0045963	0,0003087	6,2228E-05
Poprečni presjek A [m ²]	0,0004377	2,469E-05	7,7784E-05
Promjer cjevovoda d [mm]	23,61	5,61	9,95
Odabrani promjeri cjevovoda [mm]	28 x 1,5	10 x 1	12 x 1

Plus režim

Povrat medija iz isparivača se nakon izlaska iz komora spajaju u jedan usisni vod kojim stiže na rashladni agregat, a kapljevinski vod se grana na isparivače koji opskrbljuje s radnom tvari.

Tabela 25 Odabir dimenzija cjevovoda plus režim

Vodovi	Usisni	Tlačni	Kapljevinski
Odabrane brzine strujanja w [m/s]	10,5	12,5	0,8
Temperatura [°C]	-10	54	42
Gustoća ρ_{R404A} [kg/m ³]	22,05	161,29	953,93
Volumni protok q_{vR404A} [m ³ /s]	0,0036247	0,0004955	8,3787E-05
Poprečni presjek A [m ²]	0,0003452	3,964E-05	0,00010473
Promjer cjevovoda d [mm]	20,96	7,10	11,55
Odabrani promjeri cjevovoda [mm]	28 x 1,5	10 x 1	16 x 1

5. ODABIR KOMPONENTI RASHLADNOG SUSTAVA ZA UGRADNJU

5.1. Odabir kompresora

Sustav se sastoji od ukupno 4 kompresora. Za plus režim rada su paralelno spojena tri kompresora koji se zajedno sa kondenzatorom i sakupljačem radne tvari nalaze u rashladnom agregatu. Odabir kompresora u ovome slučaju preuzet je iz literature sa internetskih stranica tvrtke Blitzer.

Tabela 26 Odabir kompresora za radnu tvar R404A

	Minus režim	Plus režim		
Komora za hlađenje	Smrznutih proizvoda	Mliječnih proizvoda	Svježeg povrća	Suhomesnatih proizvoda
Izračunata potrebna snaga kompresora [kW]	4,24	0,75	1,38	1,13
Snaga odabranog kompresora [kW]	4,34	1,16	1,16	1,16
Komercijalni naziv	4H-15.2Y	2GC-2.2Y	2GC-2.2Y	2GC-2.2Y
Područje rada [°C]	-30/+50°C	-10/+50°C	-10/+50°C	-10/+50°C

5.2. Odabir isparivača i kondenzatora za ugradnju

Odabir isparivača i kondenzatora za ugradnju vršen je pomoću programa Güntner Product Calculator 01/2006 pri čemu su uvrštene vrijednosti dobivene iz prethodnog proračuna za zadane uvjete rada.

Tabela 27 Odabir isparivača

	Minus režim	Plus režim		
Komora za hlađenje	Smrznutih proizvoda	Mliječnih proizvoda	Svježeg povrća	Suhomesnatih proizvoda
Izračunata potrebna učin isparivača [kW]	5,39	1,9	3,53	2,88
Temperatura isparavanja [°C]	-30°C	-6°C	-6°C	-6°C
Učin isparivača odabran [kW]	5,5	1,95	3,6	2,9
Komercijalni naziv	S-GHF 040.1D/17-AW	GHF 031.1B/17-AW	S-GHF 020.1C/27-AW	GHF 020.1B/34-AW

Tabela 28 Odabir kondenzatora

Režim rada	Minus	Plus
Izračunata potrebna učin kondenzatora [kW]	9,63	11,56
Temperatura Kondenzacije [°C]	+45°C	+45°C
Učin kondenzatora odabran [kW]	10,7	13,6
Komercijalni naziv	GVM 042C/2-L	GVM 042C/2-N

6. Specifikacija materijala

Tabela 29 Specifikacija materijala

Oprema	Karakteristike	Kao proizvod	Komada
Kompresor	Qo=5,5 kW ,P=4,34 kW, $\vartheta_i = -30^{\circ}\text{C}$, $\vartheta_k = +50^{\circ}\text{C}$ poluhermetički, radna tvar R404A	4H-15.2Y	1
Kompresor	Qo=3,45 kW ,P=1,16 kW, $\vartheta_i = -6^{\circ}\text{C}$, $\vartheta_k = +50^{\circ}\text{C}$ poluhermetički, radna tvar R404A	2GC-2.2Y	3
Kondenzator zrakom hlađen	Q=10,7 kW, $\vartheta_k = +45^{\circ}\text{C}$, $\vartheta_i = -30^{\circ}\text{C}$	GVM042C/2- L	1
Kondenzator zrakom hlađen	Q=13,6 kW, $\vartheta_k = +45^{\circ}\text{C}$, $\vartheta_i = -6^{\circ}\text{C}$	GVM042C/2- N	1
Isparivač za hlađenje zraka	Qi=5,5 kW, $\vartheta_i = -30^{\circ}\text{C}$ $\vartheta_o = -20/-18^{\circ}\text{C}$	S-GHF 040.1D/17- AW	1
Isparivač za hlađenje zraka	Qi=1,95 kW, $\vartheta_i = -6^{\circ}\text{C}$ $\vartheta_o = +4/+6^{\circ}\text{C}$	GHF 031.1B/17- AW	1
Isparivač za hlađenje zraka	Qi=3,6 kW, $\vartheta_i = -6^{\circ}\text{C}$ $\vartheta_o = +6/+8^{\circ}\text{C}$	S-GHF 020.1C/27- AW	1
Isparivač za hlađenje zraka	Qi=2,9 kW, $\vartheta_i = -6^{\circ}\text{C}$ $\vartheta_o = +2/+4^{\circ}\text{C}$	GHF 020.1B/34- AW	1
Sakupljač	V=3,5 l radna tvar R404A	OS 54 FN	2
Filter sušač	R404	DML 165	1
Filter sušač	R404	DML 164	1
Kontrolno staklo	R404	SGI12s	1
Kontrolno staklo	R404	SGI16s	1
Elektromagnetski ventil	Ø12x1	EVR6s	4
Termoeekspanzioni ventil	Ø12x1	TES 2 +T/TE2	4
Neprovratni ventil	Ø28x1,5	NRV 28	4
Ventil	Ø10x1	GBC 10s	3
Ventil	Ø12x1	GBC 12s	2
Ventil	Ø16x1	GBC 16s	1
Ventil	Ø28x1,5	GBC 28s	4
Presostat		KP15	4
Cijevi	CuØ10x1	CuØ10x1	12m
Cijevi	CuØ12x1	CuØ12x1	2m
Cijevi	CuØ16x1	CuØ16x1	2m
Cijevi	CuØ18x1	CuØ18x1	6,1m

Cijevi	CuØ22x1	CuØ22x1	5,2m	
Cijevi	CuØ28x1,5	CuØ28x1,5	4m	
Izolacija	CuØ10x1	H10	12m	
Izolacija	CuØ12x1	H12	2m	
Izolacija	CuØ16x1	H16	2m	
Izolacija	CuØ18x1	H18	6,1m	
Izolacija	CuØ22x1	F12	5,2m	
Izolacija	CuØ28x1,5	M28	4m	
Elektro-komandni ormari	s odgovarajućom opremom za upravljanje iz hodnika		1	
Regulacijski modul	EKC		2	

7. TEHNIČKI OPIS

Rashladni sustav za hlađenje prehrambenih proizvoda u rashladnim komorama izveden je na sljedeći način.

Kondenzacijsko kompresorske jedinice smještene su na krovu zgrade iznad rashladnih komora. Rashladne komore nalaze se na prvoj etaži zgrade. Hladnjaci zraka postavljeni su pod stropom komora. Elektro ormar s regulatorima rada rashladnih uređaja nalazi se u hodniku uz rashladne komore. Tri rashladne komore rade na režimu od $+2^{\circ}\text{C}$ do $+8^{\circ}\text{C}$, a jedna rashladna komora na režimu od -18°C do -20°C . Kod rashladnih komora s režimom rada od $+2^{\circ}\text{C}$ do $+8^{\circ}\text{C}$ odabrani su kompresorski agregati koji čine jednu cjelinu u sastavu tri kompresora i jedan zračni kondenzator. Za rashladnu komoru s režimom rada -18°C do -20°C predviđen je rashladni agregat koji sadrži jedan kompresor i jedan kondenzator hlađen zrakom. Kompresori u svom sastavu sadrže i ostale elemente (automatika, armatura i zaštitne elemente).

Rashladne komore napravljene su od polyuretanskih panela s ugrađenim vratima. U komorama se nalaze police s prehrambenim artiklima. U komori (-18°C / -20°C) za smrznutu robu nalazi se isparivač (hladnjak) koji sadrži i elektrogrijače za otapanje leda u isparivačkoj sekciji, kadi te odvodu vode. Otapanje isparivača provodi se preko regulatora u pravilnim zadanim vremenskim intervalima.

Nakon određenog vremena isključuju se iz rada grijači, a uključuju se ventilatori isparivača te ostali elementi rashladnog sustava. S vremenskim pomakom u pokretanju kreće ventilator isparivača programiranim na kašnjenje od 1÷5 minuta. Kompresori sadrže grijače ulja kartera koji ne rade kada su uključeni kompresori. Zaštita kompresora od previsokog pritiska kondenzacije i preniskog tlaka usisa provodi se pomoću kombiniranog presostata KP 15. Rad svakoga od isparivača vodi zajednički termoregulator tip EKC. Kada se podigne temperatura u hlađenoj komori preko osjetnika temperature i regulatora otvara se elektromagnetski ventil za dotok freona u isparivač. Kada se postigne zadana temperatura hlađenja regulator zaustavlja rad ventilatora isparivača i zatvara elektromagnetski ventil. Ponovo pokretanje rashladnog uređaja za hlađenje komora daje regulator preko prostornog osjetnika temperature kada temperatura u prostoru dosegne gornju dopuštenu vrijednost.

8. ZAKLJUČAK

Na osnovu građevinsko-tehnološkog rješenja hladnjače izvršen je proračun rashladnih tereta za oba sustava hlađenja, uzimajući u obzir sve relevantne terete. Sukladno proračunatim teretima izvršeno je dimenzioniranje elemenata sustava hlađenja kao i odabir rashladne opreme. Prilikom dimenzioniranja uključene su i izvjesne rezerve kako bi se omogućio stabilan rad sustava u nepredviđenim radnim uvjetima, odnosno uvjetima tehnoloških odstupanja. Ovdje želim napomenuti da je pri dimenzioniranju sustava hlađenja duboko zamrznute robe uključen i teret eventualnog dohlađivanja smrznute robe što iznosi cca 60% tereta komore kada tog dohlađivanja nebi bilo. Za hlađenje komora s režimom temperature zraka iznad 0°C odabran je rashladni agregat s tri klipna poluhermetička kompresora radi bolje mogućnosti regulacije, te veće pouzdanosti rada. Oba sustava su u potpunosti automatizirana u svom radu, te osigurana od nepredviđenih radnih uvjeta.

PRILOZI

CD-R disc

Tehnička dokumentacija

LITERATURA

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [2] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [3] Škofja, L. :Lth priručnik, Loške tovarne hladilnikov
- [4] Toplinske tablice; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb 2007.; Boris Halasz, Antun Galović i Ivanka Boras
- [5] T.Ćurko, M. Malovec ; Radne tvari u tehnici hlađenja
- [6] T.Ćurko: Hlađenje i dizalice topline - radni udžbenik Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu; 2008

http://www.mbfrigo.hr/uploads/MB_Frigo/zastupstva_download/Bitzer/poluhmeticki-kompresori_kp-100-5-i.pdf

<http://www.seminarskirad.biz/seminarski/branimir%20pavkovic%20-%20tehnika%20hlađenja.pdf>

http://www.pfri.uniri.hr/~pkralj/R404A_pressure_ethalpy_si.pdf

<http://www.guentner.de/>